Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 18, No. 1, Apr. May. 2022, p. 65- 79

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۸، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۱ ص.۷۹-۶۵

Homepage: http://ifstrj.um.ac.ir

Full Research Paper

Drying kinetics of camel milk cream foam using foam mat drying and study its effect on the structure and color of the product

Morteza Kashaninejad[1], Seyed Mohammad Ali Razavi[2*], Mohammad Reza Salahi[1]

Received: 2020.10.23
Accepted: 2021.01.16

How to cite this article:
Kashaninejad, M., Razavi, S. M. A., Salahi, M. R., (2022). Drying kinetics of camel milk cream foam using foam mat drying and study its effect on the structure and color of the product. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. *18*(1), 65-79.

Abstract

Introduction: One of the products that its production has not been investigated well and is an imported product is cream powder. Foam mat drying is a widespread technique to dehydrate liquid or semi-liquid foods with high viscosity, adhesion and high sugar content, which are usually difficult to dry. Evaluating moisture content over time is the first indication of how the drying process is performed and can be used as a tool to compare the drying behavior of food. The rate of drying, which is expressed as a function of time or moisture content, is also a very important parameter that helps to understand drying properties of a material. Color can also indicate chemical changes in food during the thermal process such as browning and caramelization. Therefore, since in the drying industry, process time, product quality, optimization and equipment design are directly affected by the rate of drying of food, hence, in this study, in the process of drying the camel milk cream by the foam mat drying method, drying operation at temperatures of 45, 60 ,and 75 °C and thicknesses of 1, 3 and 5 mm was performed in a non-continuous cabinet dryer to evaluate the kinetics of drying , structure and color of the dried foam.

Materials and Methods: Camel milk cream was mixed with carboxymethyl cellulose (0.1%), cress seed gum (0.1%) and 80% whey protein concentrate (5%) at 25 ° C. After pasteurization, the samples were stirred with a mixer at a maximum speed of 1500 rpm (5 minutes) for proper aeration. The foam samples were poured into a plate in a thin layer with thicknesses of 1, 3 and 5 mm and then dried in a dryer at temperatures of 45, 60 and 75 ° C until a constant moisture was reached. The process treatments were performed in a completely randomized central composite design (CCD) (5 replications at the center point) for 2 variables at three levels. The effective diffusion coefficient was calculated based on the second Fick's law of diffusion. Then, using Arrhenius equation, which shows the relationship between temperature and effective diffusion coefficient, activation energy was also calculated. After the drying stage, in order to investigate the changes in moisture during the drying, by determining MR, we have used some experimental models that were previously used for drying agricultural products, to fit the experimental data using the statistical software MATLAB 2016.

Results and Discussion: The results showed that increasing the temperature from 45 to 75° C reduced the drying time of the samples by almost 50%. Reducing the thickness from 3 to 1 mm led to an 80% reduction in drying time of the samples. The overall effective diffusion coefficient of the tested samples varied between 7.09×10^{-10} and 8.11×10^{-9} m^2/s. The increase in the temperature led to an increase in the effective diffusion coefficient of the samples. The activation energy of the samples varied between 25.59 and 38.22 kJ /mol, and comparison of the means showed that the activation energy of the samples was also increased by increasing the foam thickness. Totally, 17 models were evaluated to investigate the drying kinetics of the samlses and in all cases of foam drying , page and Midilli models with R^2 values above than 0.99 and the lowest values of RMSE indicate the best fit with the experimental data among the 17 fitted model. Examining the digital images of the samples also showed that at low temperatures, the structure of the dried foams was

1 and 2. PhD student and Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
(∗ Corresponding Author's Email: s.razavi@um.ac.ir)
DOI: 10.22067/IFSTRJ.2021.40190.0

smooth and it became more uneven and porous as a result of increasing the temperature. Also, the trend of changes in the parameters of the gray level co-occurrence matrix (GLCM) (energy, correlation, and homogeneity) of the samples was almost the same with the changes in temperature and thickness so that, the increase in the drying temperature and a decrease in the thickness of the samples led to a decrease in these parameters. Increasing the foam thickness at high temperatures led to a decrease in the browning index and at low temperatures, led to an increase in the browning index of the samples.

Keywords: Browning index; Camel milk cream; Drying kinetics; Foam mat drying; Structure

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 18, No. 1, Apr. May. 2022, p. 65- 79

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۸، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۱ ص.۷۹-۶۵

مقاله علمی-پژوهشی

سینتیک خشک‌کردن کف خامه شیر شتر به روش کف‌پوشی و بررسی تاثیر آن بر ساختار و رنگ محصول

مرتضی کاشانی‌نژاد[1]- سید محمدعلی رضوی[2]*- محمدرضا صلاحی[1]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

چکیده

در این پژوهش، سینتیک خشک کردن، ساختار و رنگ کف خشک شده در فرآیند خشک کردن خامه شیر شتر به روش کف‌پوشی ارزیابی شد. بدین منظور فرآیند خشک کردن در ۳ دمای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد و در ۳ ضخامت ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر در یک خشک‌کن کابینتی غیرمداوم در قالب طرح مرکب مرکزی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش دما از ۴۵ به ۷۵ درجه سانتی‌گراد و کاهش ضخامت از ۳ به ۱ میلی‌متر به‌ترتیب منجر به کاهش ۵۰ و ۸۰ درصدی در زمان خشک شدن نمونه‌ها شد. ضریب نفوذ موثر کلی (D_{eff}) نمونه‌های مورد آزمون نیز بین $8/11 \times 10^{-10}$ تا $7/09 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه متغیر بود و افزایش دما منجر به افزایش معنی‌دار (سطح ۹۵ درصد) ضریب نفوذ موثر نمونه‌ها شد. انرژی فعال‌سازی (E_a) نمونه‌های مورد آزمون در دامنه ۲۵/۵۹ تا ۳۸/۲۲ کیلوژول بر مول به‌دست آمد و نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت کف، انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها نیز افزایش یافت. ۸ مدل نیز برای بررسی سینتیک خشک شدن نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت که در تمام حالت‌های خشک شدن کف از نظر دما و ضخامت، مدل‌های پیج و مدیلی با مقدار R^2 بالای ۰/۹۹ و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی بودند. بررسی تصاویر دیجیتالی نمونه‌ها نشان داد که در دماهای پایین، ساختار کف‌های خشک شده حالتی صاف داشتند و با افزایش دما، ساختار حالت غیرمسطح و متخلخل‌تری پیدا کردند. همچنین روند تغییرات پارامتر های ماتریس هم‌زمانی سطح خاکستری (GLCM) (انرژی، همبستگی و یکنواختی) نمونه‌ها با تغییرات دما و ضخامت تقریبا یکسان بود به‌طوری که افزایش دمای خشک شدن و کاهش ضخامت نمونه‌ها منجر به کاهش معنی‌دار (سطح ۹۵ درصد) این پارامترها شد. افزایش ضخامت کف نیز در دماهای بالا منجر به کاهش شاخص قهوه‌ای شدن و در دماهای پایین منجر به افزایش شاخص قهوه‌ای شدن نمونه‌ها گردید.

واژه‌های کلیدی: خامه شیر شتر، خشک کردن کف‌پوشی، ساختار، سینتیک، ضریب نفوذ موثر

مقدمه

شتر از جمله دام‌هایی است که به‌عنوان یکی از منابع مهم تولید شیر در کشور های منطق گرم و خشک محسوب می‌گردد. بخش عمده‌ای از این شیر به دلیل وجود مشکلات در تولید فرآورده‌های تخمیری چربی آن جداسازی شده و خشک می شود. بنابراین استفاده از چربی شیر شتر به‌عنوان یک محصول جانبی بسیار حائز اهمیت است. بررسی الگوی کلی اسیدهای چرب شیر شتر در مقایسه با سایر گونه‌ها مانند گاو، بز و گوسفند نشان می‌دهد که اسیدهای چرب کوتاه زنجیر (C_4-C_{12}) به میزان بسیار کمتری در شیر شتر یافت می‌شوند. اما غلظت اسیدهای چرب $C_{14:0}$، $C_{16:0}$ و $C_{18:0}$ نسبتاً زیاد و میزان $C_{16:1}$ و نسبت اسیدهای چرب غیراشباع در شیر شتر بیشتر از شیر سایر گونه‌ها است (Hassan *et al.*, 1987). از نظر متابولیسم بدن، وجود مقدار بیشتر اسیدهای چرب غیراشباع در شیر شتر (۴۳/۱ درصد) در مقایسه با شیر گاو (۳۸/۸ درصد) مفیدتر است. علاوه بر این، شیرشتر حاوی مقادیر قابل توجهی از اسیدهای چرب ضروری $C_{18:2n-6}$ می‌باشد (AlKanhal, 2010). پودر خامه فرآورده‌ای وارداتی است که تا به امروز تحقیقات زیادی در زمینه تولید آن صورت نگرفته است. از موارد استفاده پودر خامه می‌توان به کاربرد آن در صنعت شیرینی پزی و نانوایی، مصارف خانگی و دسرها، تولید بستنی، تولید خامه بازساخته[3]، استفاده در استاندارد کردن چربی شیر و تولید پنیرهای خامه‌ای اشاره کرد (Hall & Hedrick, 1966). طبق تعریف (Isiri، 2005)، پودر خامه فرآورده‌ای از شیر است که می‌تواند در نتیجه حذف آب، از شیر یا خامه به‌دست آید. پودر خامه باید دارای رنگ سفید تا زرد روشن، بافت یکنواخت بدون کلوخه و تا حد امکان بدون ذرات سوخته باشد. بنابه

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استاد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
(* ایمیل نویسنده مسئول: s.razavi@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/IFSTRJ.2021.40190.0

3 Critical moisture content Vacuum drying, spray drying and freeze drying

تعریف استاندارد بین المللی (Codex، 1999)، میزان آب در پودر خامه نباید بیش از ۲٪ باشد. در تعاریف موجود در منابع معتبر پودر خامه، فرآورده ای است که درصد چربی آن بیش از درصد چربی پودر شیر خشک کامل باشد (Carić, 1994; Hall & Hedrick, 1966). مزایای عمده پودر خامه عبارتند از کاهش حجم و صرفه جویی در هزینه انتقال و انبارداری، قابلیت نگهداری بالاتر نسبت به خامه تازه و امکان استفاده به‌جای شیر خشک پرچرب.

خشک کردن تحت خلاء[1]، خشک کردن پاششی[2] و خشک کردن انجمادی[3] از روش‌های خشک‌کردن ماده غذایی می‌باشند که موجب خشک‌کردن ماده غذایی در زمان کوتاه و با کیفیت و ارزش تغذیه‌ای بالا می‌شوند. هزینه بالا تجهیزات و عملیات خشک کردن از معایب این روش‌ها هستند (Guiné, 2018). ضمن اینکه یکی از مشکلات خشک کردن پاششی خامه مربوط به زمان منتقل کردن پودر گرم از محفظه خشک‌کن به بیرون است، زیرا با پارگی غشای گلبول‌های چربی در دمای بالای خشک‌کن، چربی به حالت مایع به سطح پودر مهاجرت می‌کند و باعث کیکی شدن پودر می‌گردد و در نهایت انتقال و جریان پذیری پودر خامه را با محدودیت روبه رو می‌نماید (O’Callaghan & Hogan, 2013). خشک‌کردن کف پوشی روش مناسبی برای خشک کردن مواد غذایی مایع یا شبه مایع با ویسکوزیته بالا، چسبنده و حاوی قند بالا که به سختی خشک می‌شوند، می‌باشد (Labelle, 1984). در حالت کفی، به‌دلیل ساختار متخلخل ترکیبات، انتقال جرم به سرعت انجام می‌شود که این امر منجر به کاهش زمان خشک شدن و حفظ کیفیت و ارزش تغذیه‌ای محصول خشک شده می‌گردد (Brygidyr *et al*., 1977). در این روش، مواد غذایی مایع و شبه مایع با افزودن ترکیبات کف‌زا و پایدارکننده و وارد کردن هوا توسط همزدن به شکل کف پایدار در آمده و سپس با استفاده از هوای گرم در فشار اتمسفری خشک شده و به شکل ورقه نازک متخلخل در می‌آیند. از جمله مزایای این روش می‌توان به آسان بودن، هزینه پایین، امکان خشک‌کردن نسبتاً سریع در دمای پایین و مناسب بودن آن برای خشک‌کردن مواد غذایی حساس به حرارت اشاره کرد (Labelle, 1984). ارزیابی محتوای رطوبتی در طی زمان، اولین نشانه از چگونگی انجام فرایند خشک‌کردن می‌باشد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار جهت مقایسه رفتار خشک شدن مواد غذایی مورد استفاده قرار گیرد. سرعت خشک شدن که به‌عنوان تابعی از زمان یا محتوای رطوبتی بیان می‌شود، نیز پارامتر بسیار مهمی است که به درک ویژگی‌های خشک شدن یک ماده کمک می‌کند. نفوذ رطوبت در مواد غذایی با اشکال معین را می‌توان تحت شرایط مشخصی از سرعت خشک شدن تخمین زد. مدل‌سازی سینتیک خشک کردن نیز روابط بین متغیرهای زمان و رطوبت را ارائه می‌دهد که می‌تواند شیوه مناسبی برای کنترل زمان و شرایط خشک‌کردن باشد و هدف از فرآیند مدل‌سازی، برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های تجربی و انتخاب مناسب‌ترین مدل جهت بررسی روند تغییرات ماده غذایی طی فرایند خشک‌کردن، طراحی خشک‌کن‌های صنعتی مناسب، شبیه‌سازی و یا بهبود سیستم‌های مورد استفاده می‌باشد (Inyang *et al*., 2018). تغییرات رنگ هم می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات شیمیایی در مواد غذایی در حین فرآیند حرارتی (مانند قهوه‌ای شدن و کاراملیزاسیون) باشد (DeMan *et al*., 1999). این پارامتر از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی پودر است که به‌طور مستقیم بیانگر شرایط اعمال شده به هنگام خشک‌کردن و کیفیت محصول نهایی می‌باشد. ساختار یک ماده نیز تعیین کننده خواص عملکردی آن بوده و تغییر خواص ماکروسکوپی مواد تحت تاثیر تغییر در ساختار میکروسکوپی می‌باشد به‌طوری که وجود ساختار متخلخل سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از ماده غذایی طی فرآیند خشک‌کردن می‌شود. لذا بررسی ریز ساختار نیز می‌تواند به درک درستی از مکانیسم‌ها و تغییرات در خواص کیفی به‌خصوص تغییرات در بافت ماده غذایی کمک نماید (Xiao *et al*., 2009).

در یک جمع‌بندی می‌توان بیان کرد که اگرچه تحقیقات مختلفی روی فرآیند سینتیک خشک‌کردن، ساختار و رنگ در فرایند خشک‌کردن برخی از مواد غذایی انجام شده است اما متاسفانه اطلاعاتی در مورد بررسی این پارامترها در فرآیند خشک‌کردن خامه شیر شتر به روش کف‌پوشی موجود نیست. از آنجایی که در صنعت خشک‌کردن، زمان انجام فرایند، کیفیت محصول، بهینه‌سازی و طراحی تجهیزات مستقیماً تحت تاثیر سرعت خشک‌کردن مواد غذایی قرار دارند (Chen & Mujumdar, 2009)، از این رو در پژوهش حاضر فرآیند خشک‌کردن خامه شیر شتر به روش کف‌پوشی در دمای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد و در ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر در یک خشک‌کن کابینتی غیرمداوم در سه تکرار صورت پذیرفت و فرآیند سینتیک خشک‌کردن، ساختار و رنگ کف خشک شده مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تهیه کف خامه شتر

شیر شتر از بازار محلی[4] مشهد، ایران تهیه شد و چربی آن پس از پیش گرم شدن (تا دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد)، توسط سپراتور جدا شد. در مرحله بعد، نمونه های خامه با ۳۷ درصد چربی با استفاده از مخلوط شیر پس‌چرخ[5] و چربی تولیدی بر اساس مربع پیرسون تهیه شد. خامه تهیه شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به همراه کربوکسی متیل سلولز (۰/۱ درصد)، صمغ دانه شاهی (۰/۱ درصد) و کنسانتره پروتئینی آب

1 Vacuum drying
2 Spray drying
3 Freeze drying

4 Local market
5 Skim

پنیر ۸۰ درصد (۵ درصد) مخلوط شدند. نمونه‌ها در دمای ۸۰ درجه به مدت ۵ دقیقه در حمام آب پاستوریزه شدند و سپس در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد توسط هموژنایزر اولتراتوراکس (IKA، آلمان) هموژنیزه گردیدند و در نهایت به‌منظور آبگیری کامل به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۶-۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال قرار گرفتند. روز بعد، نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌وسیله همزن با حداکثر دور ۱۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه همزده شدند تا هوادهی مناسب صورت پذیرفت.

خشک‌کردن کف خامه شیر شتر

خشک‌کردن نمونه‌ها توسط خشک‌کن غیرمداوم کابینتی با جریان هوای داغ انجام شد. نمونه های کف درون پلیت به صورت لایه نازک با ضخامت‌های ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر ریخته شدند و سپس درون خشک‌کن با دماهای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به رطوبت ثابت خشک شدند. در مرحله بعد نمونه‌ها از خشک‌کن خارج شدند و لایه خشک شده مورد ارزیابی قرار گرفت.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تیمارهای فرآیند نیز به روش کاملاً تصادفی در قالب طرح مرکب مرکزی (CCD) (۵ تکرار در نقطه مرکزی) برای ۲ متغیر (ضخامت کف و دمای خشک‌کردن) و در سه سطح انجام شد به صورتی که تعداد کل تیمارها ۱۳ تیمار بود (جدول ۱).

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل طرح مرکب مرکزی نمونه‌های کف خامه شیر شتر خشک شده به روش کف‌پوشی

Table 1- Levels of independent variables for central composite design of camel milk cream foam using foam mat drying

Drying temperature (°C) دمای خشک‌کردن (درجه سانتی‌گراد)	Foam thickness (mm) ضخامت کف (میلی‌متر)	Treatment تیمار
75	2	**1**
45	3	**2**
75	3	**3**
75	1	**4**
60	3	**5**
60	2	**6**
60	2	**7**
60	1	**8**
45	2	**9**
45	1	**10**
60	2	**11**
60	2	**12**
60	2	**13**

بررسی سینتیک خشک‌کردن

برای مطالعه سینتیک خشک کردن، در فواصل زمانی مشخص، نمونه‌ها از خشک‌کن خارج شدند و توسط ترازوی دیجیتال (AND.EK-300i، ژاپن) با دقت ۰/۰۱± گرم توزین شدند. نمونه‌ها تا رسیدن به وزن ثابت توزین شدند. جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن نیز ابتدا مقدار نسبت رطوبت (MR) با استفاده از مقدار رطوبت اولیه (MR)، رطوبت تعادلی (Me) و رطوبت در هر لحظه (M) طبق رابطه ۱ محاسبه شد (Ertekin & Yaldiz, 2004).

$$MR = \frac{M-M_e}{M_i-M_e} \qquad (۱)$$

محاسبه ضریب نفوذ موثر

ضریب نفوذ موثر بر مبنای قانون دوم فیک[1] برای تیغه نامحدود با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Liu *et al.*, 2009).

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}exp\left(-\frac{(2n-1)^2\mu^2 D_{eff}t}{4L^2}\right) \qquad (۲)$$

که در این رابطه MR نسبت رطوبت، D_{eff} ضریب نفوذ موثر رطوبت (m^2/s)، L ضخامت کف (متر) و t زمان خشک‌کردن (ثانیه) و n=1,2,3 ، عدد صحیح مثبت است. با حل معادله فیک، نفوذ رطوبت را می‌توان با استفاده از رابطه ۳ محاسبه کرد (Falade & Solademi, 2010):

$$Ln(MR) = Ln\left(\frac{8}{\mu^2}\right) - \left(\frac{\mu^2 D_{eff}t}{4L^2}\right) \qquad (۳)$$

با رسم نمودار Ln(MR) در برابر زمان خشک‌کردن نیز یک خط مستقیم با شیب K (رابطه ۴) به‌دست می‌آید که از آن برای محاسبه ضریب نفوذ موثر استفاده می‌شود:

1 Fick's second law

$$K = \frac{\mu^2 D_{eff}}{4L^2} \qquad (۴)$$

محاسبه انرژی فعال‌سازی

در این تحقیق، با استفاده از معادله آرنیوس که رابطه بین دما و ضریب نفوذ مؤثر (معادله ۵) را نشان می‌دهد، انرژی فعال‌سازی محاسبه شد (Lopez *et al*., 2000).

$$D_{eff} = D_0 exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \qquad (۵)$$

که در آن D_0 فاکتور آرنیوس (m^2/s)، E_a انرژی فعال‌سازی برای نفوذ رطوبت (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازهای ایده‌آل (kJ/k.mol) و T دمای مطلق بر حسب کلوین (K) می‌باشد. با رسم LnD_{eff} در برابر عکس دما، انرژی فعال‌سازی را می‌توان تعیین کرد.

برازش منحنی‌های خشک‌کردن و انتخاب بهترین مدل

در جدول ۲، مدل‌های تجربی نیوتن، پیج، هندرسون و پابیس، دو جمله‌ای، لگاریتمی، تقریب انتشار، میدیلی، توزیع ویبل جهت خشک‌کردن محصولات کشاورزی ارائه شده است. پس از اتمام مرحله خشک شدن، به‌منظور بررسی تغییرات رطوبت طی زمان خشک‌کردن، با تعیین MR، مدل‌های ارائه شده در این جدول جهت برازش داده‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفتند. برای برازش داده‌ها روش رگرسیون غیر خطی به کار گرفته شد و به کمک نرم‌افزار Matlab 2016، داده‌ها با مدل‌های مذکور برازش داده شدند. برای سنجش کیفیت مدل‌های برازش داده شده، پارامترهای آماری شامل ضریب تبیین (R^2) (رابطه ۶) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۷) مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت مدلی انتخاب گردید که دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE باشد (Akpinar, 2006):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{i,Pre}-MR_{i,Exp}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(MR_{i,Exp}-MR_{i,Pre\ mean}\right)^2} \qquad (۶)$$

$$\mathrm{RMSE} = \left(\frac{1}{N}\sum_{I=1}^{N}\left(\mathrm{MR_{i,Pre}}-\mathrm{MR_{i,Exp}}\right)\right)^{1/2} \qquad (۷)$$

که در این روابط $MR_{i,exp}$ نسبت رطوبت در i امین اندازه‌گیری، $MR_{i,pre}$ نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و z تعداد ضرایب ثابت به‌کار رفته در هر مدل می‌باشد.

جدول ۲- مدل‌های ریاضی مورداستفاده برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن خامه شیر شتر

Table 2- Mathematical models for modeling of drying kinetics of camel milk cream

References مرجع	Model مدل	Name	NO.
(Lemus- Mondaca et al., 2009)	$MR = \exp(-kt)$	Newton نیوتن	1
(Sun et al., 2007)	$MR = \exp(-kt^n)$	Page پیج	2
(Akgun & Doymaz, 2005)	$MR = a\exp(-kt)$	Henderson and Pabis هندرسون و پابیس	3
(Zielinska & Markowski, 2010)	$MR = a\exp(-bt) + c\exp(-dt)$	Two- term دو جمله‌ای	4
(Liu et al., 2009)	$MR = a\exp(-kt) + c$	Logarithmic لگاریتمی	5
(Menges & Ertekin, 2006)	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	Approximation of diffusion تقریب انتشار	6
(Vega-Gálvez et al., 2012)	$MR = a\exp(-kt^n) + bt$	Midilli میدیلی	7
(Babalis et al., 2006)	$MR = a - b\exp(-kt^n)$	Weibull distribution توزیع ویبل	8

استخراج خصوصیات تصویر نمونه‌ها

جهت عکس‌برداری از نمونه‌ها، ۵۰ گرم از هر نمونه درون پلیت آزمایشگاهی ریخته شد. تجهیزات عکس‌برداری شامل یک اتاقک تاریک (جهت جلوگیری از ایجاد نوسان در عکس‌برداری و عدم بازتاب نور) و شش لامپ فلورسنت بود. عکسبرداری با استفاده از دوربین دیجیتال (Canon PowerShot A550) متصل به رایانه صورت گرفت. دوربین در فاصله ۲۰ سانتی‌متری نمونه‌ها و موازی با آن روی پایه ثابت قرار گرفت. کلیه تصاویر به فرمت JPG و دارای وضوح ۲۰۰۰×۲۵۰۰ پیکسل در قالب مدل رنگی RGB بودند. به‌منظور حذف بخش‌های اضافه تصویر و نیز کاهش حجم کار پردازش تصویر در ابتدا برشی از تصاویر به ابعاد ۵۰۰× ۵۰۰ با استفاده از نرم‌افزار Image J

(National Institute of Health, USA) به‌دست آمد و سپس آنالیز تصاویر نیز با استفاده از همین نرم‌افزار صورت پذیرفت. بدین منظور ابتدا عمل آستانه‌گیری[1] در کانال رنگی خاکستری با شدت ۵ ±۹۵ انجام شد و سپس ویژگی‌های تصویر نظیر انرژی، همبستگی و یکنواختی مورد بررسی قرار گرفت (Mir Arab Razi، 2014).

از مدل رنگی CIE L*a*b*، L* (سیاه صفر تا سفید ۱۰۰)، a* (قرمز ۶۰ تا سبز ۶۰-) و b* (زرد ۶۰ تا آبی ۶۰-) نیز برای تعیین پارامترهای رنگ نمونه‌ها استفاده شد که میانگین مقادیر L*، a* و b* برای ۱۵ نمونه در دو تکرار اندازه‌گیری شد و در نهایت شاخص قهوه‌ای‌شدن[2] که میزان تغییر رنگ محصول به سمت رنگ قهوه‌ای را نشان می‌دهد، با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد:

$$BI = \frac{(100-(X-0.31))}{0.71} \quad (۸)$$

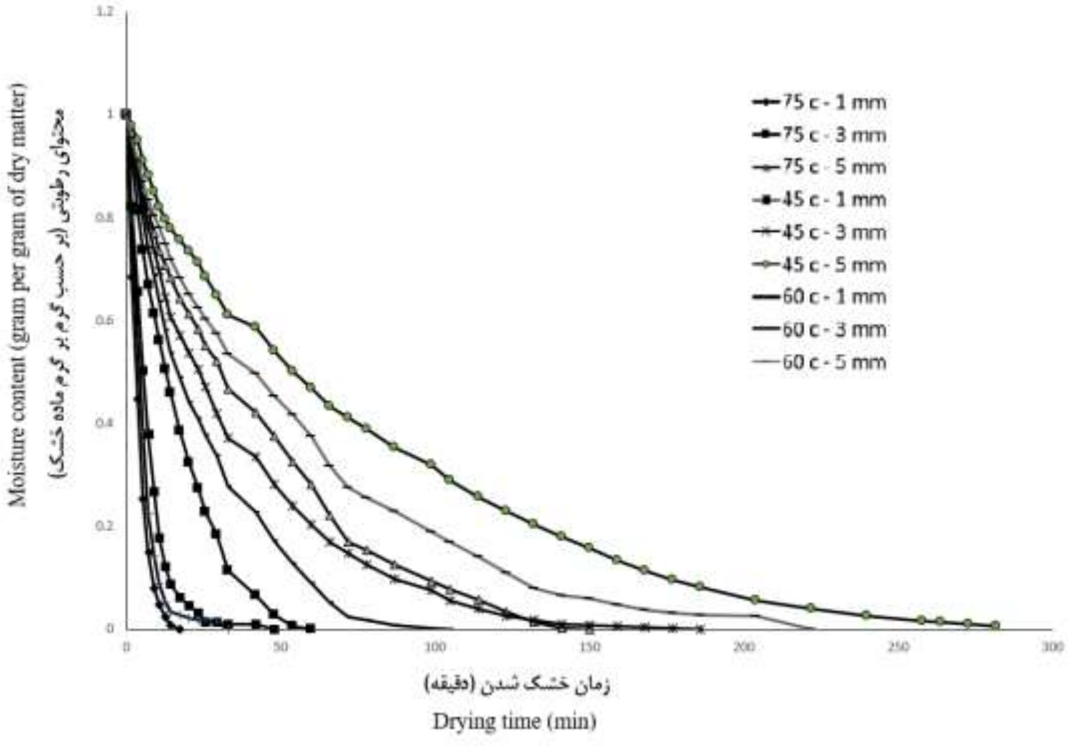
که در ان X برابر است با معادله (۹):

$$X = \frac{a+1.75L}{5.645L+a-3.012b} \quad (۹)$$

نتایج و بحث

بررسی منحنی‌های خشک شدن

شکل ۱ منحنی‌های خشک شدن کف خامه شیر شتر در ضخامت‌های ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر در دماهای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با مشاهده شکل می‌توان دریافت که با افزایش دمای خشک شدن و کاهش ضخامت کف، مدت زمان خشک شدن نمونه‌های کف کاهش پیدا کرده است، به‌طوری که افزایش دما از ۴۵ به ۷۵ درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش تقریبا ۵۰ درصدی زمان خشک شدن نمونه ها شد. همچنین کاهش ضخامت از ۳ به ۱ میلی‌متر، زمان خشک شدن نمونه ها را ۸۰ درصد کاهش داد. سجادی (۱۳۹۶) نیز نشان داد که افزایش دمای خشک‌کردن کف پوشی نمونه های خامه شیر گاو از ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد، موجب کاهش ۳۰ درصدی زمان خشک‌کردن نمونه ها شد. همچنین مطابق شکل ۱، با توجه به تغییرات شیب منحنی هر نمونه می‌توان نتیجه گرفت که سرعت خشک شدن کف خامه شیر شتر در مراحل اولیه خشک شدن در مقایسه با مراحل نهایی بالاتر است (شیب بیشتر منحنی) و خشک شدن کف غالبا در دوره سرعت نزولی انجام می‌شود.



شکل ۱-تغییرات میزان رطوبت با زمان خشک‌کردن کف خامه شیر شتر در دماها و ضخامت های مختلف

Fig. 1. Changes of moisture content with the drying time of camel milk cream foam at different temperatures and thicknesses.

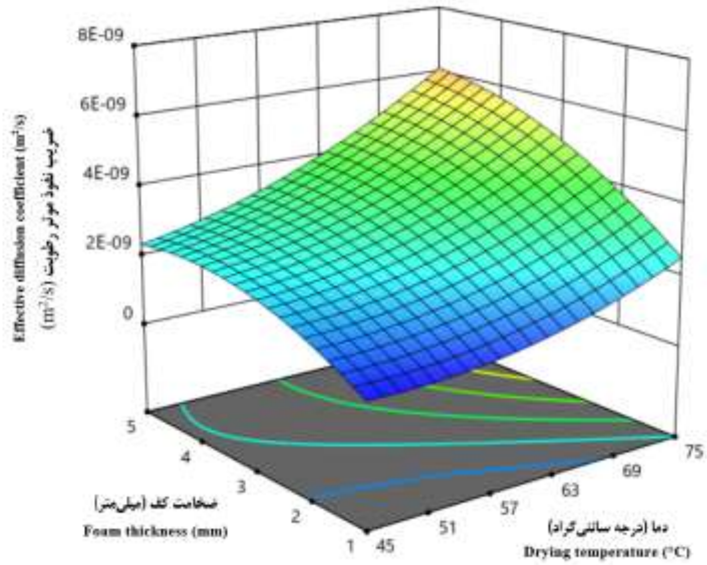
1 Threshold

2 Browning index

به‌طور کلی منحنی خشک‌کردن نمونه‌های مورد بررسی را می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی کرد. در بخش اول، سرعت خشک‌کردن تقریباً ثابت و در بخش دوم، سرعت نزولی است. نقطه‌ای که این دو بخش را از هم جدا می‌کند، نقطه بحرانی رطوبتی[1] نامیده می‌شود. در بخش اول، سرعت خروج آب از منافذ کف به سطح آن با سرعت تبخیر در سطح یکسان است. رطوبت بحرانی تابعی از سرعت خشک‌کردن است (Tsotsas *et al.*, 2000). سرعت بالای خشک‌کردن (برای مثال در دمای بالا و ضخامت کم)، رطوبت بحرانی را افزایش می‌دهد، یعنی کف در مقدار رطوبت بالاتری وارد مرحله سرعت نزولی می‌شود. در این حالت به تدریج لایه‌های خشک سطحی به مرکز کف نزدیک می‌شوند و در حقیقت آب از لایه های داخلی ماده تبخیر شده و از منافذ کف خشک شده، کندتر از حالت اول به طرف بالا آمده و از سطح کف خارج می‌شود (Benmakhlouf et al., 2017).

ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال‌سازی

نتایج تحقیق نشان داد که رابطه LnMR با زمان غیرخطی بود که نشان‌دهنده تغییر ضریب نفوذ موثر با محتوای رطوبتی است که این رفتار برای کلیه نمونه‌ها مشاهده شد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که ضریب نفوذ موثرکلی نمونه‌های مورد آزمون بین $۸/۱۱ \times ۱۰^{-۱۰}$ تا $۷/۰۹ \times ۱۰^{-۹}$ متر مربع بر ثانیه متغیر بود. بر اساس نتایج تحلیل واریانس، اثرات خطی دما و ضخامت در سطح ۹۹ درصد و اثر متقابل دما- ضخامت در سطح ۹۵ درصد بر ضریب نفوذ موثر نمونه‌ها معنی‌دار بود. شکل ۲ تأثیر دما و ضخامت را بر ضریب نفوذ موثر نمونه‌های خامه شیر شتر را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش دما ضریب نفوذ موثر نمونه ها افزایش پیدا کرده است که دلیل این امر اثر مثبت دما در افزایش شدت فعل و انفعالات و جنبش مولکولی است. همچنین می‌توان دریافت با افزایش ضخامت کف نیز مقادیر ضریب نفوذ موثر افزایش پیدا کرده است، این در حالی است که مطابق نتایج بررسی ها افزایش ضخامت منجر به کاهش سرعت خشک شدن شده بود. تغییر در ساختار منافذ مواد غذایی ضریب نفوذ را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در فرآورده‌های متخلخل‌تر، ضریب نفوذ موثر به خاطر امکان تحرک بیشتر رطوبت، بالاتر است (Benmakhlouf *et al.*, 2017). همچنین نتایج تحقیق نشان داد که مقدار شیب خط در هر دو قسمت خشک شدن در هر ۳ دمای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش ضخامت کاهش یافت اما میزان ضریب نفوذ موثر افزایش یافت. با افزایش ضخامت، مهاجرت رطوبت درونی در فاصله بیشتری نسبت به ضخامت‌های کمتر اتفاق می‌افتد، که این امر سبب افزایش میزان ضریب نفوذ موثر در ضخامت‌های بالاتر می‌شود. بنابراین الزاما بالاتر بودن ضریب نفوذ نشان‌دهنده بالاتر بودن سرعت خشک شدن و در نتیجه کمتر بودن زمان خشک شدن نیست، بلکه این دو پارامتر به مقدار و ضخامت نمونه نیز بستگی دارند. نتایج مشابه‌ای برای خشک‌کردن کف پوشی پالپ طالبی (Salahi *et al.*, 2015)، پالپ انبه (Rajkumar *et al.*, 2007) و ریزجلبک *اسپیرولینا پلاتنسیس*[2] (Atarodi, 2014) گزارش شده است.



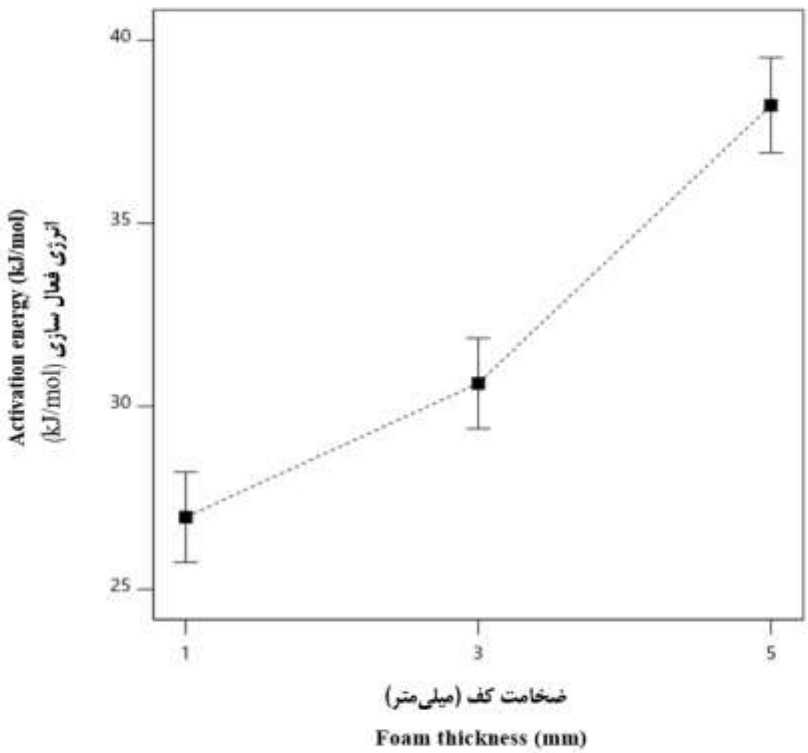
شکل ۲- تأثیر دما و ضخامت بر ضریب نفوذ موثر نمونه‌های کف خامه شیر شتر

Fig. 2. The effect of temperature and thickness on the effective diffusion coefficient of camel milk cream foam samples.

1 Critical moisture content

2 Spirulina platensis

در شکل ۳ تغییرات انرژی فعال‌سازی خشک‌کردن کف خامه شیر شتر به‌عنوان تابعی از ضخامت نمونه‌ها نشان داده شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، انرژی فعال‌سازی نمونه‌های مورد آزمون بین ۲۵/۵۹ تا ۳۸/۲۲ کیلوژول بر مول متغیر در دامنه دمایی ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد بود و نتایج مقایسه میانگین‌ها نیز نشان داد که بین انرژی فعال‌سازی نمونه‌های با ضخامت‌های ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر اختلاف آماری معنی‌دار وجود دارد، به‌طوری که با افزایش ضخامت کف، انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها نیز افزایش یافت (شکل ۳). انرژی فعال‌سازی حساسیت یک واکنش یا فرآیند را به دما نشان می‌دهد. در واقع افزایش انرژی فعال‌سازی نمونه‌ها با افزایش ضخامت کف نشان‌دهنده افزایش حساسیت ضریب نفوذ موثر نمونه‌های با ضخامت بالاتر نسبت به ضخامت‌های کمتر در برابر تغییرات دمای شرایط خشک شدن است. Sajadi (2018) انرژی فعال‌سازی خشک‌کردن کف‌پوشی خامه شیر گاو را در دامنه دمایی ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۳ میلی‌متر برابر ۱۹/۹۵ کیلوژول بر مول گزارش کرد که نشان‌دهنده حساسیت کمتر ضریب نفوذ موثر خامه شیر گاو در مقایسه با خامه شیر شتر در برابر تغییرات دما تحت شرایط خشک‌کردن کف‌پوشی است.



شکل ۳- تغییرات انرژی فعال‌سازی با ضخامت خشک‌کردن کف خامه شیر شتر

Fig. 3. Activation energy changes with drying thickness of camel milk cream foam.

مدلسازی فرآیند خشک کردن کف‌پوشی و انتخاب بهترین مدل

داده‌های حاصل از آزمایش‌های خشک‌کردن (نسبت‌های رطوبتی (MR) در مقابل زمان) با ۸ مدل نیمه تجربی (جدول ۳) برازش شدند. مدل‌های مختلف توسط چهار معیار ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تعدیل شده (R^2adj)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) با یکدیگر مقایسه و در نهایت مدلی انتخاب گردید که دارای بیشترین مقدار R^2 و R^2adj و کمترین مقدار RMSE و SSE باشد. با توجه به معیارهای بیان شده برای انتخاب بهترین مدل، در تمام حالت‌های خشک شدن کف بهینه از نظر دما و ضخامت، مدل‌های پیج و مدیلی با مقدار R^2 و R^2adj بالای ۰/۹۹ دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی بود. ثابت‌های مدل های پیج و مدیلی در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج سایر پژوهشگران نیز نشان داده است که برای خشک‌کردن کف پوشی خامه شیر گاو و پنیر (Izadi *et al.*, 2020)، مدل میدلی مناسب‌ترین بوده است. همچنین برای خشک‌کردن سیب زمینی در خشک‌کن هوای داغ (Yaghoubi *et al.*, 2013)، خشک‌کردن کیوی، آواکادو و موز (Ceylan *et al.*, 2007)، کیوی خشک شده با سامانه مادون قرمز (Inyang *et al.*, 2018)، قارچ دکمه‌ای (Salahi *et al.*, 2017) و لایه نازک کدو حلوایی (Ghaboos *et al.*, 2016) در تمامی دماهای مورد مطالعه، مدل پیج دارای بهترین برازش بوده است.

جدول ۳- ثابت‌های مدل های پیج و مدیلی برای تیمارهای مختلف خشک‌کردن کف‌پوشی خامه شیر شتر

Table 2- Constants of page and midilli models for different treatments of drying of camel milk cream using foam mat drying

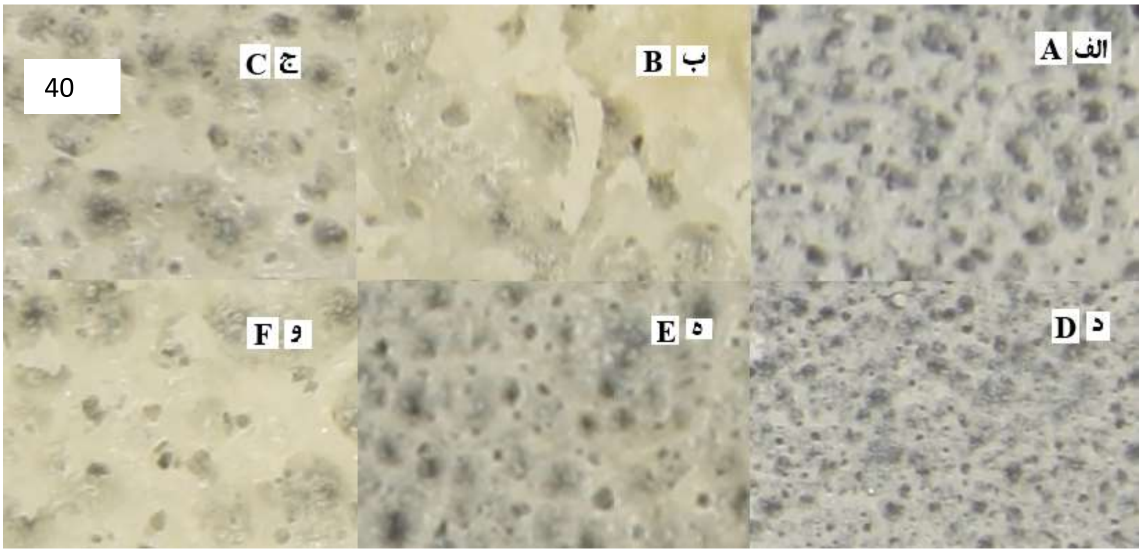
Midilli model مدل مدیلی				Page model مدل پیج		Drying temperature (°C) دمای خشک‌کردن (درجه سانتی‌گراد)	Foam thickness (mm) ضخامت کف (میلی‌متر)	Treatment تیمار
n	k	b	a	N	k			
-36.93	6.014	-0.015	0.375	1.286	0.079	75	2	1
-21.02	1.813	-0.003	0.741	0.898	0.019	45	3	2
0.776	0.043	-0.001	1.006	0.960	0.027	75	3	3
1.45	0.106	-0.0004	0.995	1.46	0.106	75	1	4
1.303	-0.001	-0.012	0.919	0.957	0.204	60	3	5
0.919	0.051	-0.0005	1.009	0.997	0.042	60	2	6
0.864	0.057	-0.0006	1.019	0.969	0.043	60	2	7
1.092	0.174	0.0012	1.004	1.03	0.186	60	1	8
0.817	0.056	-0.0003	1.038	0.899	0.041	45	2	9
1.344	0.0672	0.0004	0.955	1.22	0.088	45	1	10
0.881	0.045	-0.0007	0.995	0.961	0.037	60	2	11
0.954	0.057	-0.0003	1.022	1.033	0.046	60	2	12
0.801	0.045	-0.0009	0.994	0.922	0.036	60	2	13

تأثیر دمای خشک‌کردن بر ریز ساختار کف

تصاویر دیجیتال خامه شیر شتر خشک شده به روش کف‌پوشی برخی تیمارهای جدول ۱ در شکل ۴ ارائه شده است. در بررسی تصاویر مشخص شد که در دماهای پایین ساختار کف‌های خشک شده حالتی صاف دارد و با افزایش دما، ساختار حالت غیرمسطح و متخلخل‌تری پیدا کرده است. دلیل این رفتار را می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش دما (احتمالاً به دلیل کاهش زمان خشک شدن)، فروپاشی و ترکیب شدن حباب‌های مجاور کمتر اتفاق افتاده که منجر به افزایش تخلخل و یکنواخت‌تر شدن اندازه منافذ شده است (Azizpour *et al.*, 2014). همچنین تصاویر دیجیتال نمونه‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت، کف خشک شده حالت مسطح داشته و تخلخل کمتری دارد که احتمالا دلیل این امر فروپاشی ساختار کف به دلیل طولانی شدن زمان خشک شدن می‌باشد. نتایج مشابه‌ای برای خشک‌کردن کف پوشی پالپ طالبی (Salahi *et al.*, 2017)، میگو (Azizpour *et al.*, 2014) و ماهی کیلکا (Hassanzadeh et al., 2019) مشاهده شده است. Thuwapanichayanan و همکاران (۲۰۱۱) اثر دمای خشک‌کردن را بر نفوذ رطوبت و ویژگی‌های کیفی برش‌های موز مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که دمای خشک‌کردن به شدت روی ساختار موز خشک شده اثر گذاشته و با افزایش دما اندازه و تعداد حفرات افزایش پیدا کرده که این امر اثر قابل توجهی بر ویژگی سختی بافت نمونه‌ها داشته است.

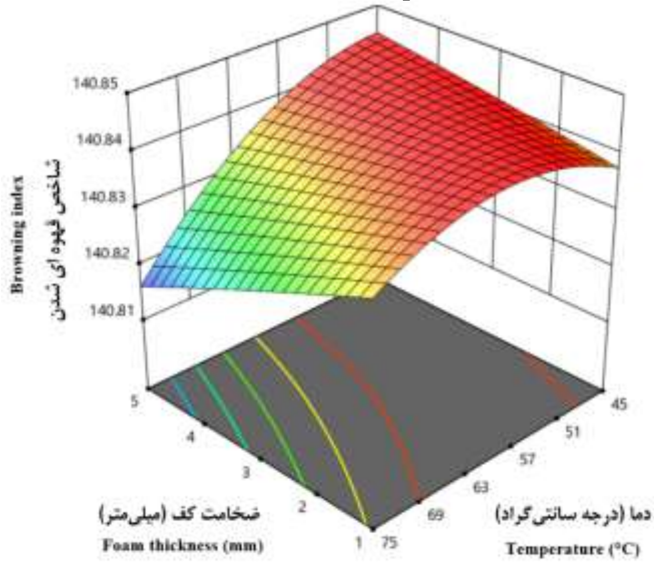
رنگ

دما و زمان خشک کردن از مهمترین پارامترهای موثر بر تغییرات رنگ مواد غذایی هستند (Qing-Guo *et al.*, 2006). رنگ نمونه‌ها می‌تواند تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی از جمله دمای خشک کردن، مدت زمان خشک شدن، قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیرآنزیمی، محتوای رطوبت و رطوبت سطحی قرار بگیرد (Dehghannya *et al.*, 2018; Salahi *et al.*, 2017). نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص قهوه‌ای شدن نمونه‌های مورد آزمون بین ۱۴۰/۸۱ تا ۱۴۰/۸۴متغیر بود و در بین اثرات خطی، متقابل و درجه دوم، اثر خطی دما و ضخامت و اثر متقابل دما- ضخامت در سطح ۹۹ درصد بر روی شاخص قهوه‌ای‌شدن نمونه ها معنی‌دار بودند. شکل ۵ اثر ضخامت کف و دما بر شاخص قهوه‌ای شدن نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ٤- تصاویر دیجیتال برخی نمونه‌های کف خامه شیر شترخشک شده به روش کف‌پوشی: الف- ضخامت ۱ میلی متر و دمای ٤۵ درجه سانتی‌گراد، ب- ضخامت ۲ میلی‌متر و دمای ۷۵ درجه سانتی گراد، ج- ضخامت ۳ میلی‌متر و دمای ۷۵ درجه سانتی گراد، د- ضخامت ۱ میلی‌متر و دمای ٦٠ درجه سانتی‌گراد، ه- ضخامت ۳ میلی‌متر و دمای ٦٠ درجه سانتی‌گراد، و- ضخامت ۳ میلی‌متر و دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد.

Fig. 4. Digital images of samples of camel milk cream foam using foam mat drying: (A) thickness of 1 mm and temperature of 45°C; (B) thickness of 2 mm and temperature of 75°C; (C) thickness of 3 mm and temperature of 75°C; (D) thickness of 1 mm and temperature of 60°C; (E) thickness of 3 mm and temperature of 60°C; (F) thickness of 3 mm and temperature of 75°C.



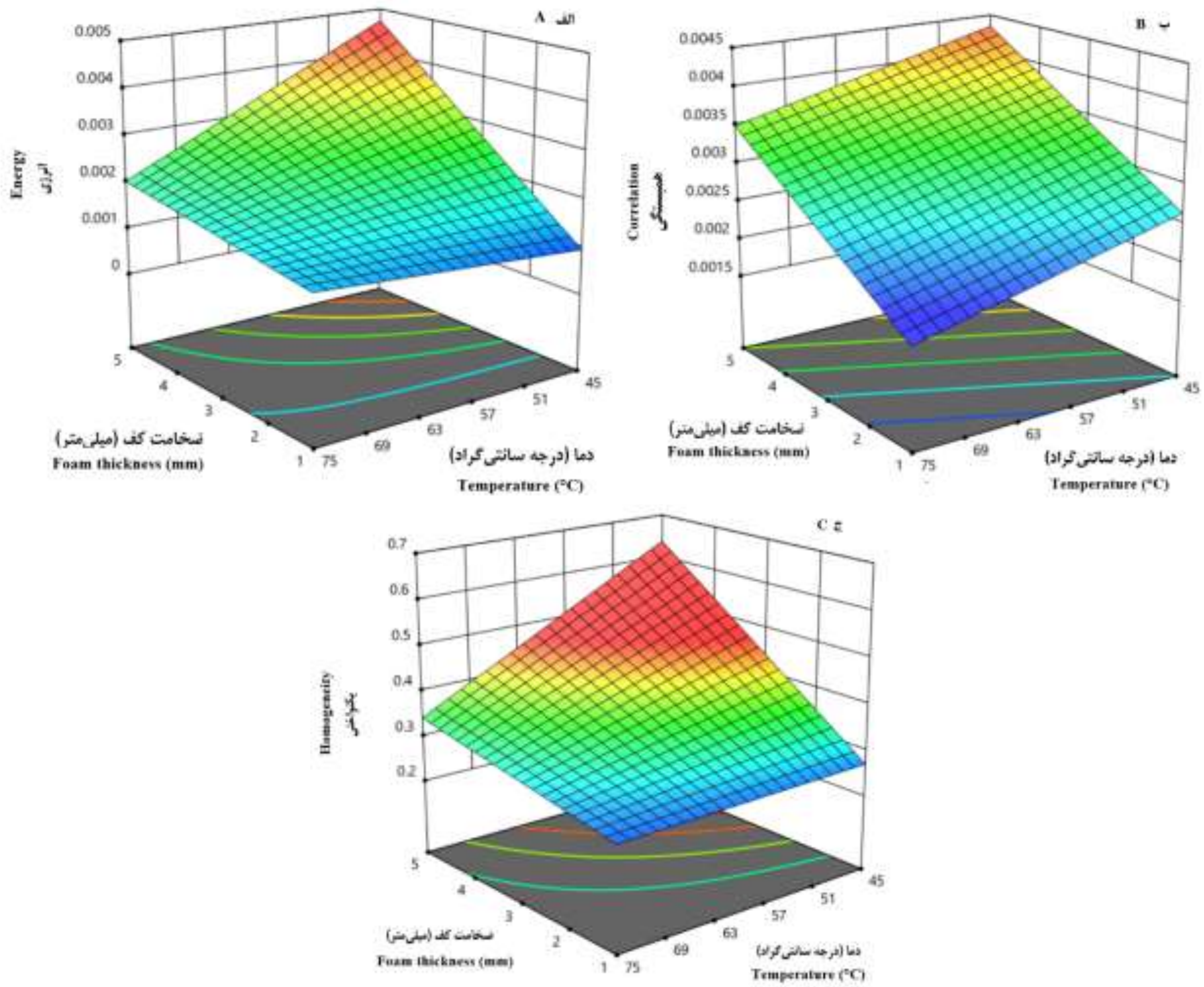
شکل ۵- اثر ضخامت کف و دما بر شاخص قهوه‌ای‌شدن نمونه های کف خامه شیر شترخشک شده

Fig. 5. The effect of temperature and thickness on the browning index of Dried camel milk cream foam samples

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش دمای خشک شدن، شاخص قهوه‌ای شدن نمونه‌ها کاهش می‌یابد. افزایش ضخامت نیز در دماهای بالا منجر به کاهش شاخص قهوه‌ای شدن و در دماهای پایین منجر به افزایش شاخص قهوه‌ای شدن نمونه‌ها گردید. به نظر می‌رسد که در دماهای بالا به دلیل بالا بودن سرعت خشک‌شدن کف، زمان لازم برای انجام واکنش‌های قهوه‌ای شدن و در نتیجه تیره شدن رنگ نمونه‌ها نسبت به دماهای پایین کمتر است. با افزایش ضخامت کف، سرعت خشک شدن کاهش یافته، در نتیجه مدت زمان خشک شدن افزایش می‌یابد و این شرایط زمینه را برای وقوع واکنش‌های قهوه‌ای شدن مناسب‌تر می‌سازد. تغییرات مشابهی برای تغییرات رنگی پودر پنیر تولید شده به روش کف‌پوشی (Izadi et al., 2020) مشاهده شد.

ماتریس هم‌زمانی سطح خاکستری (GLCM)

نتایج این تحقیق نشـان داد که انرژی، همبسـتگی و یکنواختی نمونه های مورد آزمون به‌ترتیب بین 10^{-4} ×۶/۵ تا 10^{-3} ×۴/۵، ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۴ و ۰/۲۴ تا ۰/۴۶ متغیر بود. همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داد که ضخامت و دما در سطح ۹۹ درصد بر انرژی، همبستگی و یکنواختی نمونه‌ها و اثر متقابل ضخامت- دما نیز در سطح ۹۵ درصد بر انرژی نمونه ها معنی دار بودند. شکل ۶ اثر ضخامت و دما بر انرژی (الف)، همبستگی (ب) و یکنواختی (ج) نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ٦- اثر ضخامت کف و دما بر انرژی (الف)، همبستگی (ب) و یکنواختی (ج) نمونه‌های کف خامه شیر شترخشک شده

Fig. 6. The effect of temperature and thickness on the (A) energy (B) correlation and (C) homogeneity of Dried camel milk cream foam samples

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود روند تغییرات انرژی، همبستگی و یکنواختی با تغییرات دما و ضخامت تقریبا یکسان است، به‌طوری که افزایش دمای خشک شدن نمونه‌ها منجر به کاهش انرژی، همبستگی و یکنواختی نمونه‌ها گردید. افزایش ضخامت کف نیز منجر به افزایش انرژی، همبستگی و یکنواختی نمونه‌ها می شود. مشابه این نتایج برای خشک کردن کف‌پوشی پالپ طالبی گزارش شده است (Salehi *et al.*, 2017). کاهش پارامترهای انرژی، همبستگی و یکنواختی با افزایش دما کاهش یافت که این امر می‌تواند ناشی از تخلخل بالاتر در کف‌های خشک شده به دلیل سرعت بالاتر خشک شدن باشد. همچنین با افزایش ضخامت کف، تخلخل نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است که این امر نیز می‌تواند به دلیل طولانی شدن فرآیند خشک شدن و فروپاشی بیشتر ساختارهای کف باشد که در نهایت این تغییرات با افزایش یکنواختی بیشتر سطح کف خشک شده، منجر به افزایش انرژی، همبستگی و یکنواختی نمونه‌ها شده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه فرآیند خشک کردن خامه شیر شتر به روش کف‌پوشی از اهمیت بالایی برخوردار است و در صنعت خشک کردن، زمان انجام فرآیند، کیفیت محصول، بهینه‌سازی و طراحی تجهیزات مستقیما تحت تاثیر سرعت خشک کردن مواد غذایی قرار دارند و مدل‌سازی سینتیک خشک کردن، روابط بین متغیرهای زمان و رطوبت را ارائه می‌دهد که می‌تواند راهکار مناسبی برای کنترل زمان و شرایط خشک کردن باشد لذا در این پژوهش فرآیند سینتیک خشک کردن، ساختار و رنگ کف خامه شیر شتر خشک شده در دمای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر در یک خشک‌کن کابینتی غیرمداوم مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که افزایش دما منجر به کاهش زمان خشک شدن و پارامترهای ماتریس هم‌زمانی سطح خاکستری (انرژی، همبستگی و یکنواختی) و افزایش ضریب نفوذ موثر و شاخص قهوه ای شدن نمونه‌ها شد که در این حالت ساختار حالت غیرمسطح و متخلخل‌تری نیز داشت. افزایش ضخامت نمونه‌ها نیز منجر به افزایش زمان خشک شدن، انرژی فعال‌سازی و همه پارامترهای ماتریس هم‌زمانی سطح خاکستری نمونه‌ها گردید. همچنین از میان ۸ مدلی که برای بررسی سینتیک خشک شدن کف بهینه مورد ارزیابی قرار گرفتند مدل‌های پیج و مدیلی با مقدار R^2 و Adj R^2 بالای ۰/۹۹ دارای بهترین برازش با داده‌های آزمایشی بودند. بنابراین به‌طور کلی با بررسی و ارزیابی فرآیند سینتیک خشک کردن، ساختار و رنگ کف خامه شیر شترخشک شده و درک درستی از مکانیسم‌ها و تغییرات در خواص کیفی نمونه ها، می‌توان نتیجه گرفت که خشک کردن کف‌پوشی روش مناسبی برای تولید پودر خامه شیر شتر بوده است.

تشکر و قدردانی

از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (طرح ۹۶۰۱۵۵۴۰) و معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد (طرح ۵۱۶۳۷) بابت حمایت مالی و تجهیزاتی این پروژه تشکر و قدردانی می شود.

منابع

1. Akgun, N. A., & Doymaz, I. (2005). Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of food engineering*, 68(4), 455-461 .https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.023
2. Akpinar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of food engineering*, 73(1), 75-84 .https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.007
3. Al Kanhal, H. A. (2010). Compositional, technological and nutritional aspects of dromedary camel milk. *International Dairy Journal*, *20*(12), 811-821. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.04.003
4. Atarodi, M.R. (2014). Optimization of production conditions of Spirulina Platensis microalgae powder using floor drying method, Master Thesis, Ferdowsi University of Mashhad [In Persian].
5. Azizpour, M., Mohebbi, M., Hossein Haddad Khodaparast, M., & Varidi, M. (2014). Optimization of foaming parameters and investigating the effects of drying temperature on the foam-mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). *Drying Technology*, 32(4), 374-384 .https://doi.org/10.1080/07373937.2013.794829
6. Babalis, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of food engineering*, 75(2), 205-214 . 10.1016/j.jfoodeng.2005.04.008
7. Benmakhlouf, N., Azzouz, S., Monzó-Cabrera, J., Khdhira, H., & Elcafsi, A. (2017). Controlling mechanisms of moisture diffusion in convective drying of leather. *Heat and Mass Transfer*, 53(4): 1237-1245. https://doi.org/10.1007/s00231-016-1900-8
8. Brygidyr, A., Rzepecka, M., & McConnell, M. (1977). Characterization and drying of tomato paste foam by hot air and microwave energy. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 10(4), 313-319 . https://doi.org/10.1016/S0315-5463(77)73553-9
9. Carić, M. (1994). Concentrated and dried dairy products: VCH Publishers Inc.
10. Ceylan, İ., Aktaş, M., & Doğan, H. (2007). Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits. *Applied Thermal Engineering*, 27(11-12), 1931-1936 .https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.020
11. Chen, X. D., & Mujumdar, A. S. (2009). Drying technologies in food processing: John Wiley & Sons.
12. Codex stan 207-1999, Standard for cream powder, half cream powder and high fat milk powder.
13. Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2018). Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. Powder technology, 328, 470-484 .https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.034
14. DeMan, J. M., Finley, J. W., Hurst, W. J., & Lee, C. Y. (1999). Principles of food chemistry: Springer.
15. Ertekin, C., & Yaldiz, O. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of food engineering, 63(3), 349-359 .https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.007

16. Falade, K. O., & Solademi, O. J. (2010). Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. *International journal of food science & technology*, 45(2), 278-288. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02133.x
17. Ghaboos, S. H. H., Ardabili, S. M. S., Kashaninejad, M., Asadi, G., & Aalami, M. (2016). Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices. *Journal of food science and technology*, 53(5), 2380-2388 .https://doi.org/10.1007/s13197-016-2212-1
18. Guiné, R. (2018). The Drying of Foods and its Effect on the Physical-chemical, sensorial and Nutritional Properties. *International Journal of Food Engineering*, 2(4), 93-100 .doi: 10.18178/ijfe.4.2.93-100
19. Hall, C. W., & Hedrick, T. I. (1966). Drying milk and milk products. Drying milk and milk products .
20. Hassan, A., Hagrass, A., Soryal, K., & El-Shabrawy, S. (1987). Physico-chemical properties of camel milk during lactation period in Egypt. Egyptian Journal of Food Science (Egypt) .
21. Hassanzadeh, M., Shahidi, F., and Salahi, M. (2019). Investigation of process parameters and physical and chemical properties of kilka fish during floor drying. Iranian Food Science and Technology Research, 14 (4), 601-616 [In Persian].
22. Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic models for drying techniques—food materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8(02), 27 .DOI: 10.4236/aces.2018.82003
23. Izadi, Z., Mohebbi, M., Shahidi, F., Varidi, M., & Salahi, M. R. (2020). Cheese powder production and characterization: A foam-mat drying approach. *Food and Bioproducts Processing*, 123, 225-237 . https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.019
24. Labelle, R. (1984). Principles of foam mat drying. Journal of Food Technology, 20, 89-91 .
25. Lemus- Mondaca, R., Betoret, N., Vega- Galvez, A., & Lara- Aravena, E. (2009). Dehydration characteristics of papaya (*Carica Pubenscens*): determination of equilibrium moisture content and diffusion coefficient. *Journal of Food Process Engineering*, 32(5), 645-663 .https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00236.x
26. Liu, X., Qiu, Z., Wang, L., Cheng, Y., Qu, H., & Chen, Y. (2009). Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of Panax notoginseng extract. Energy Conversion and Management, 50(4), 928-932 . https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.032
27. Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A., & Virseda, P. (2000). Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market. *Drying Technology*, 18(4-5), 995-100. https://doi.org/10.1080/07373930008917749
28. Menges, H. O., & Ertekin, C. (2006). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of food engineering*, 77(1), 119-125 .https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.049
29. Mir Arab Razi, S. (2014). The effect of sodium caseinate proteins, whey concentrate, albumin and gelatin on the sensory and physicochemical properties of chocolate mousse, M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad [In Persian].
30. O'Callaghan, D., & Hogan, S. (2013). The physical nature of stickiness in the spray drying of dairy products—a review. *Dairy Science & Technology*, 93(4-5), 331-346 .https://doi.org/10.1007/s13594-013-0114-9
31. Qing-Guo, H., Min, Z., Mujumdar, A. S., Wei-hua, D., & Jin-cai, S. (2006). Effects of different drying methods on the quality changes of granular edamame. *Drying Technology*, 24(8), 1025-1032 .
32. Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., Raghavan, G., & Ratti, C. (2007). Foam mat drying of alphonso mango pulp. *Drying Technology*, 25(2), 357-365 .https://doi.org/10.1080/07373930600776217
33. Sajadi, S. (2018). Drying cream flooring: optimizing foam production conditions and evaluating powder properties, M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad [In Persian].
34. Salahi, M. R., Mohebbi, M., & Taghizadeh, M. (2015). Foam- mat drying of cantaloupe (*cucumis melo*): optimization of foaming parameters and investigating drying characteristics. Journal of Food Processing and Preservation, 39(6), 1798-1808 .https://doi.org/10.1111/jfpp.12414
35. Salahi, M. R., Mohebbi, M., & Taghizadeh, M. (2017). Development of cantaloupe (Cucumis melo) pulp powder using foam-mat drying method: Effects of drying conditions on microstructural of mat and physicochemical properties of powder. *Drying Technology*, 35(15), 1897-1908 .https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1291518
36. Salehi, F., Kashaninejad, M., & Jafarianlari, A. (2017). Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices. *Heat and Mass Transfer*, 53(5), 1751-1759 . https://doi.org/10.1007/s00231-016-1931-1
37. Sun, J., Hu, X., Zhao, G., Wu, J., Wang, Z., Chen, F., & Liao, X. (2007). Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Food science and technology international*, 13(2), 91-97 . https://doi.org/10.1177/1082013207078525
38. Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Kunwisawa, J., & Soponronnarit, S. (2011). Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT-Food Science and Technology*, 44(6), 1502-1510 .https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.01.003

39. Tsotsas, E., Gnielinski, V., & Schlünder, E.-U. (2000). Drying of Solid Materials. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
40. Vega-Gálvez, A., Lara, E., Flores, V., Di Scala, K., & Lemus-Mondaca, R. (2012). Effect of selected pretreatments on convective drying process of blueberries (var. O'neil). *Food and Bioprocess Technology*, 5(7), 2797-2804 . https://doi.org/10.1007/s11947-011-0656-x
41. Xiao, H.-W., Lin, H., Yao, X.-D., Du, Z.-L., Lou, Z., & Gao, Z.-j. (2009). Effects of different pretreatments on drying kinetics and quality of sweet potato bars undergoing air impingement drying. International Journal of Food Engineerig. 5 (5) .https://doi.org/10.2202/1556-3758.1758
42. Yaghoubi, M., Askari, B., Mokhtarian, M., Tavakolipour, H., Rad, A. E., Jafarpour, A., & Heidarian, S. (2013). Possibility of using neural networks for moisture ratio prediction in dried potatoes by means of different drying methods and evaluating physicochemical properties. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 15(4), 258-269 .
43. Zielinska, M., & Markowski, M. (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 49(2), 212-218 .https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.12.005